

*Стабильность работы нормально
проводящих структур при высокой
средней тепловой нагрузке.*

В.В. Парамонов

ИЯИ РАН, Москва

Содержание

1. История вопроса, основные понятия, причины развития неустойчивости, основной механизм развития.
2. Связь $df-dE$, компенсированные структуры и простые цепочки.
3. Применение и анализ для простой цепочки на примере RFQ.
4. Способы подавления

История вопроса, основные понятия,

Нарушение стабильной работы не очень коротких резонаторов, работающих с высокой средней тепловой нагрузкой.

Тепловая нагрузка $Ph=dPa/dl$ – в таком виде – это частотно независимый инвариант задачи охлаждения. Второй показатель – Duty Factor (DF)–уже весь режим в целом.

Не очень короткий $L > (3-4)\lambda$, (условно).

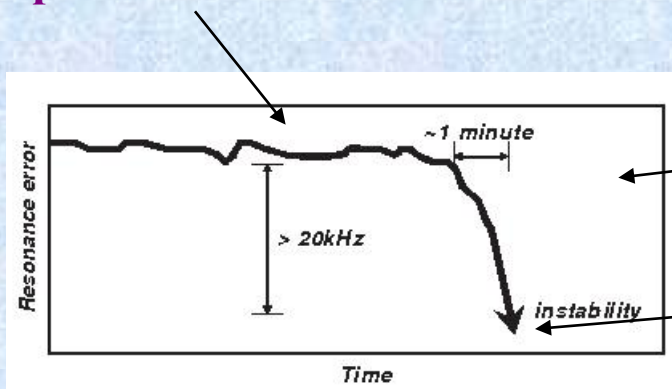
Интенсивные ЛУ Н- - LAMF, ММФ (70 –е годы), $Ph=(3-5)$ кВт/м, $DF \sim 3\%$.

SNS, J-PARC, Linac 4 – $Ph=(10-45)$ кВт/м, $DF \sim 6\%$, до 15%, до 10%.

Разрезные микротроны непрерывного действия $Ph \sim$ кВт/м, $DF 100\%$, специальная процедура ввода ВЧ мощности.

Ходили слухи о ~ 230 кВт/м.....

Проявления -

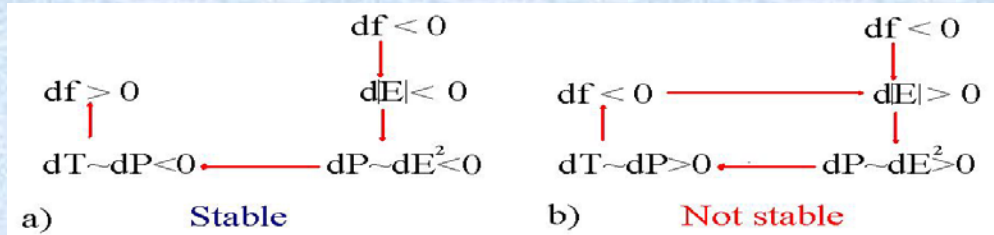


Резонатор с питанием от мощного автогенератора -эксперимент.

И вперед, через необратимые пластические деформации к

Причины неустойчивости – флуктуации в режимах. Флуктуации есть всегда. Первый кандидат – охлаждение. Охлаждение производится потоком в турбулентном режиме, $V \sim (1-3) \text{ m/sec}$, $Re \sim 14000$.

Пусть есть локальная флуктуация. Средние по резонатору величины обеспечиваются внешними системами. А дальше вариантов два....



Проявление неустойчивости заключается в **нарастающем во времени нарушении продольного распределения поля** в резонаторе.

В этой цепочке два звена без сомнений $dE - dP$ и $dP - dT$. Критичным является соотношение $df - dE$ – связь локального изменения частоты с вызываемым локальным изменением поля. **Надо $df < 0$, $dE < 0$.**

Это зависит от дисперсионных свойств резонатора и их реализации. Метод анализа:

Для бипериодических структур – метод эквивалентных схем, или связанных осцилляторов:

$$\delta f = f_c - f_a$$

$\delta f > 0$ **stable**

$\delta f < 0$ **not stable**

L. Young

Y. Yamazaki

CW Side Coupled Linac for the Los Alamos/NBS Racetrack Microtron. IEEE Trans. on Nucl. Sci., V. NS-30, n.4, p. 3508, 1983.

Study of Alternating Periodic Structure Cavities with a Disc Loaded Waveguide Model. Part. Accel. v. 22, p. 273, 1988.

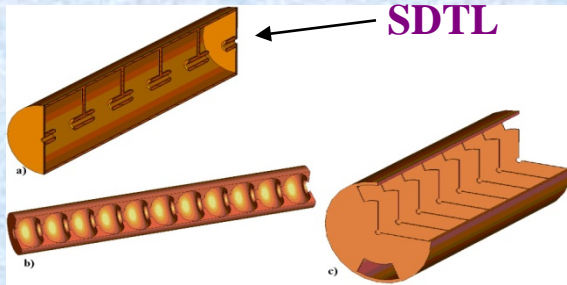
Электродинамика.

$$E = E_n + \sum_{\nu \neq n} E_\nu \frac{f_\nu^2}{f_n^2 - f_\nu^2} \frac{1}{W_0} \int_{\Delta V} (Z_0^2 H_n H_\nu^* - E_n E_\nu^*) dV.$$

Теорема возмущений в многомодовом приближении и первом порядке по $\Delta V/V$

А. Гуренч, Полые резонаторы и волноводы, 1952. Б.
Мурин, Линейные ускорители ионов, т.2, 1978

Структуры из простых периодических цепочек Рабочие 0- или π - моды в определении трансляции (знакопеременное – запутывает).



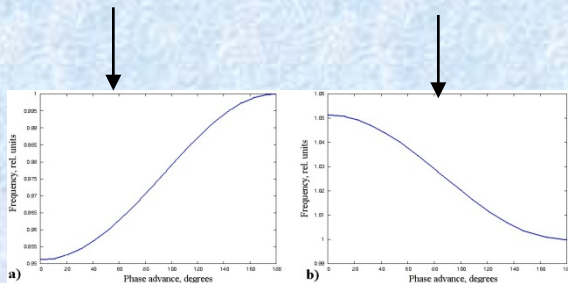
$$E = E_n + \sum_{\nu \neq n} E_\nu \frac{f_\nu^2}{f_n^2 - f_\nu^2} \frac{1}{W_0} \int_{\Delta V} (Z_0^2 H_n H_\nu^* - E_n E_\nu^*) dV.$$

$$E_{m\nu} = E_{\nu 0} \cos(m\nu\pi),$$

$$f_\nu = \frac{f_c}{\sqrt{1 + k_c \cos(\nu\pi)}},$$

$$E = E_n + \sum_{\nu \neq n} 2E_\nu a_\nu \frac{\Delta f_j}{f_j} \cos(jn\pi) \cos(j\nu\pi),$$

Дисперсия



положительная отрицательная

Важен вклад ближайших по частоте мод

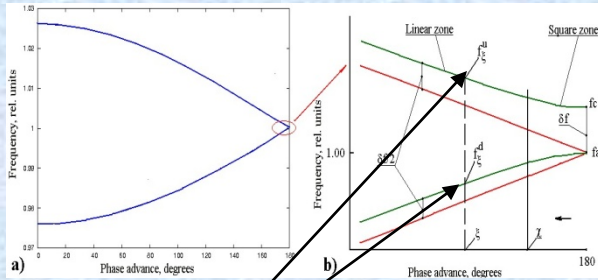
Table 1: Thermal stability of simple structures

Operating mode	Dispersion	Thermal stability
0 (2π)	positive	No
0 (2π)	negative	Yes
π	positive	Yes
π	negative	No

V. Paramonov, Proc. Linac 2008, 2008

Компенсированные (бипериодические, $\pi/2$ моды) структуры, SCS, ACS, OCS, DAW, CDS, PcDTL

Дисперсия



$$E = E_n + \sum_{\nu \neq n} E_\nu \frac{f_\nu^2}{f_n^2 - f_\nu^2} \frac{1}{W_0} \int_{\Delta V} (Z_0^2 H_n H_\nu^* - E_n E_\nu^*) dV.$$

$$E = E_a \left(1 + \sum_m \frac{64 \delta f \Delta f_a N_p \cos j\theta_m \cos i\theta_m}{f_a^2 m^2 k_c^2} \right)$$

$$f_\xi^{u,b} \approx f_a + \frac{\delta f}{2} \pm \frac{f_a k_c \xi}{4} - \frac{f_a k_c^2 \xi^2}{8},$$

$$a_{\xi_m} = a_{\xi_m}^u + a_{\xi_m}^b = \frac{(f_{\xi_m}^u)^2}{f_a^2 - (f_{\xi_m}^u)^2} + \frac{(f_{\xi_m}^b)^2}{f_a^2 - (f_{\xi_m}^b)^2}.$$

В компенсированной структуре вклады соседних с рабочим колебаний в распределение рабочего поля (при отклонениях и возмущениях) **компенсируются**

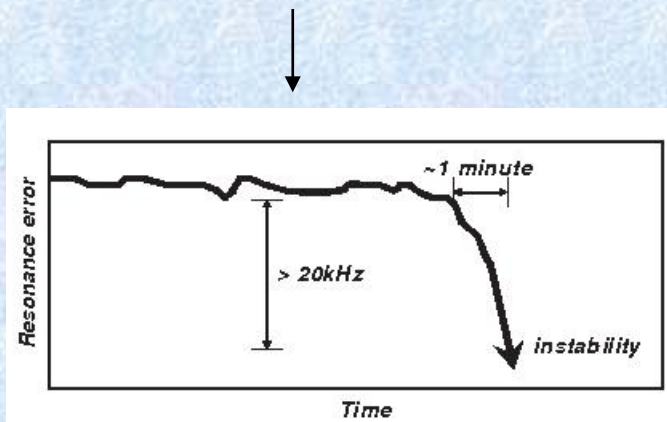
Компенсированную структуру всегда можно настроить (при изготовлении) на условие стабильности $\delta f \Delta f_a < 0$

ACS J-PARC (до 45 кВт/м), CDS PITZ (до 20 кВт/м), $\delta f > 0$.

4-vane RFQ without resonant coupling has 0-type operating TE210 operating mode with **positive dispersion** for TE21n modes. The structures with 0-type operating mode and positive dispersion are **thermally unstable**.

Проявление неустойчивости не является ежедневным явлением, но иногда бывает. После того, как SNS получил **два необратимых** события, они поставили эксперимент.

Резонатор RFQ SNS, $f=402,5$ MHz, DF=6%.



$$f_n^2 = f_0^2 + \left(\frac{nc}{2L_c}\right)^2, \quad \vec{E}_n = \sqrt{2}\vec{E}_0 \cos\left(\frac{n\pi z}{L_c}\right),$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \sum_n \sqrt{8}\vec{E}_0 \frac{\delta f_0}{f_0} \left(1 + \frac{4L_c^2}{n^2\lambda_0^2}\right) \cos\left(\frac{n\pi z_0}{L_c}\right).$$

Цепочка процессов

$$d(\delta f) \sim \delta x \sim \delta T \sim \delta P \sim \delta E \sim \delta f$$

$$\delta f_0 \sim A_0 e^{\zeta t}$$

$$\zeta \simeq B_0 \frac{P_a}{x_i^2} \frac{L_c^2}{\lambda_0 c V} \frac{\alpha D_c}{E_c}, \quad A_0, B_0 = const$$

Феноменологический подход

Анализ

$$\zeta \simeq B_0 \frac{P_a}{x_i^2} \frac{L_c^2}{\lambda_0 c V} \frac{\alpha D_c}{E_c}, \quad A_0, B_0 = const$$

режим конструкция материал

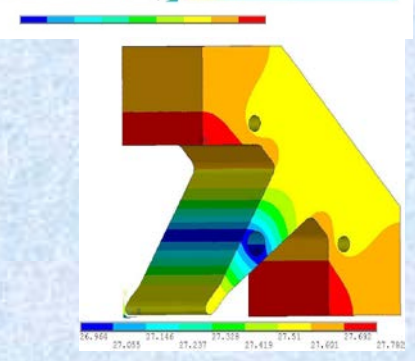
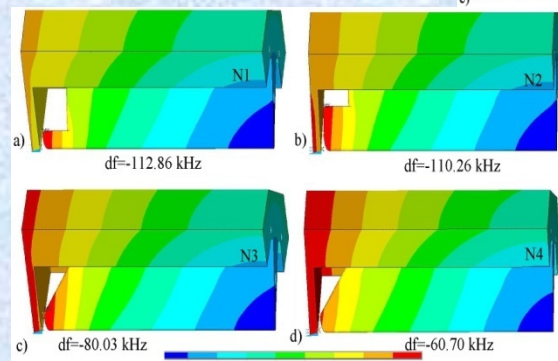
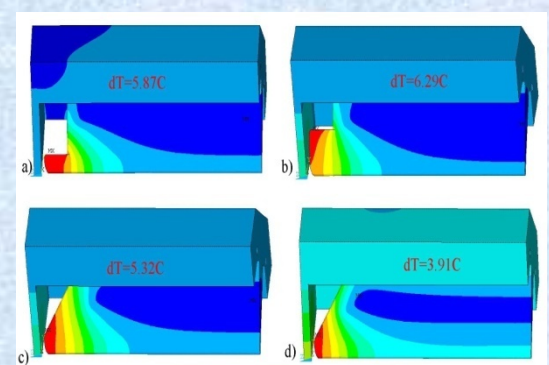
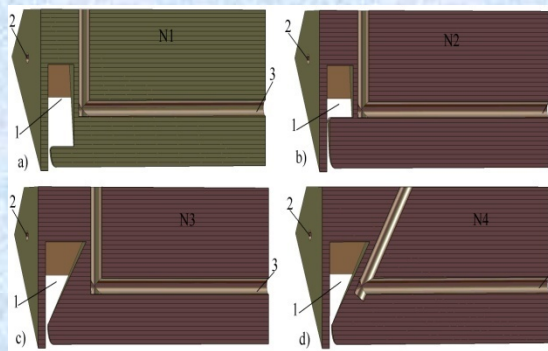
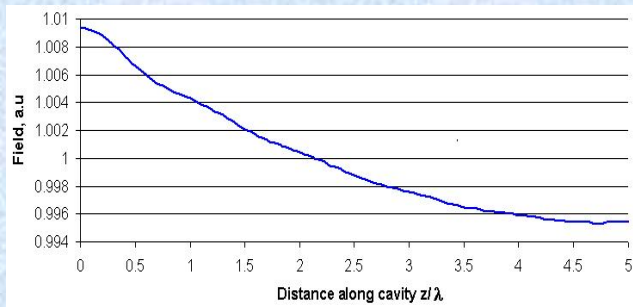
Величина инкремента зависит от средней ВЧ мощности и **очень быстро** растет с рабочей частотой $\zeta \sim f^4$

Сравнение RFQ по этому параметру.

Распределение поля в FRQ сильно зависит от погрешностей и уходов торцов – наиболее сильное возбуждение ближайшей моды.
Есть “погрешности” разработки и конструкции, которые усугубляют ...

α and E_c are the linear expansion coefficient and Young module for copper, $D_c = K_c / (\rho_c C_c)$ is the thermal diffusivity for copper, K_c, ρ_c, C_c are the heat conductivity, density and specific heat values for copper,

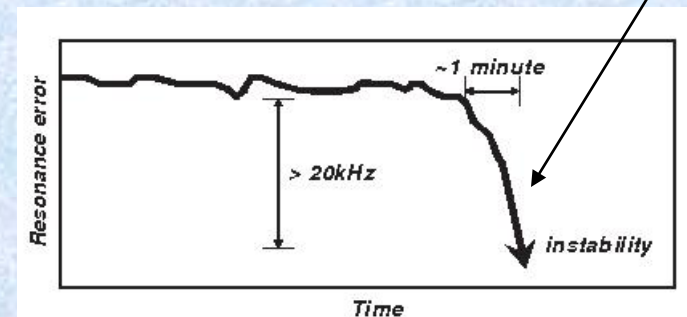
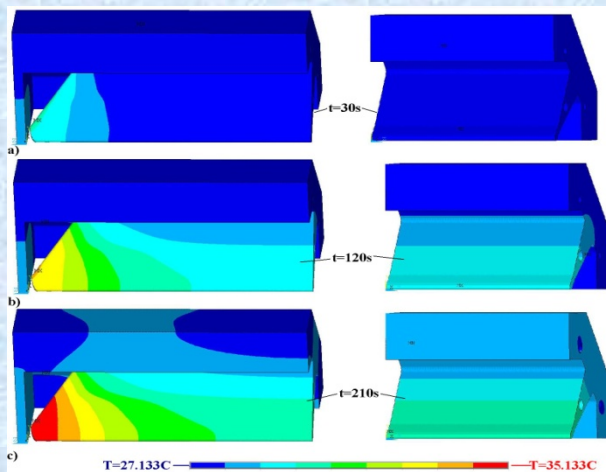
Для развития неустойчивости длительность инициирующей флуктуации $\tau \sim 1/\zeta$. RFQ, как правило, реализуют с $E_{\max} = 1,8 E_k \sim f^{1/2}$, Поэтому **высокочастотный RFQ с высокой тепловой нагрузкой качественно** более чувствителен к флуктуациям режима.



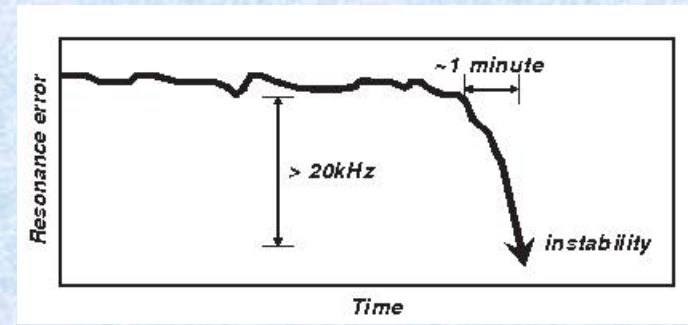
The field distribution along the cavity for the local end detuning $-0.001 f_0$

Уходы частот торцов разные и для “сапога” эта разница максимальна. Усугубляет – RFQ с нарастающим по длине напряжением. Величина $1/\zeta$ меньше времени выхода резонатора на режим, можно свалиться сразу

По оценкам (расчетам) все нормально. Есть эффекты, но вроде явно “не значительные”. Стартуем. Но иногда почему то бывает ...



Как бороться



1. Техническое решение – быстрые тюнеры на торцах. J-PARC, SNS, <1 sec .
2. Техническое решение – независимое охлаждение с регулировкой сегментов RFQ – CERN, IFMIF?
3. Физическое решение – компенсированный RFQ, LEDA, CSNS?
4. В 1 и 2 – главное успеть. С тюнерами – нет проблем. По воде ?
5. Как сформировать компенсированный FRQ?
6. Согласно уставу.

COUPLED RADIO-FREQUENCY QUADRUPOLES AS COMPENSATED STRUCTURES*

M. Jean Brownan (AT-6) and Lloyd M. Young (AT-1)
Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545

Устав гласит: Компенсированными называются периодические структуры, в которых на рабочей частоте совпадают частоты двух колебаний с сопряженной четностью распределения поля. Одно из них является рабочим, второе – колебание связи.

1. Берем длинный однородный RFQ и режем на куски, которые объявляем периодами d .
2. Сопряженная четность – это \cos и \sin (magnetic – electric). С рабочим все в порядке с начала. Это $\cos(0)$
3. Значит в середину периода надо что-то напихать, чтобы на рабочей частоте лег полный $\sin(2\pi z/d)$ и частота рабочего $\cos(0)$ не сместилась. Young сделал так.
4. Потом торцы подработать чтобы и \sin и \cos не уходили.

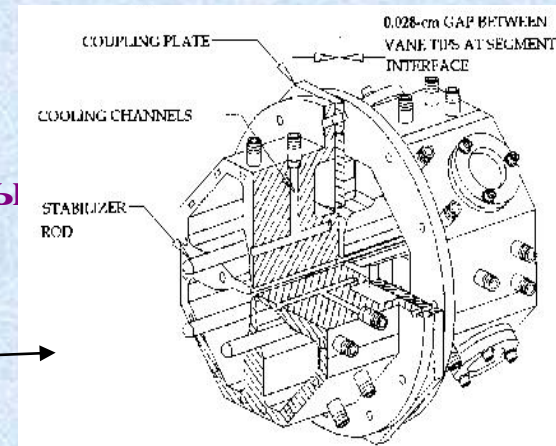
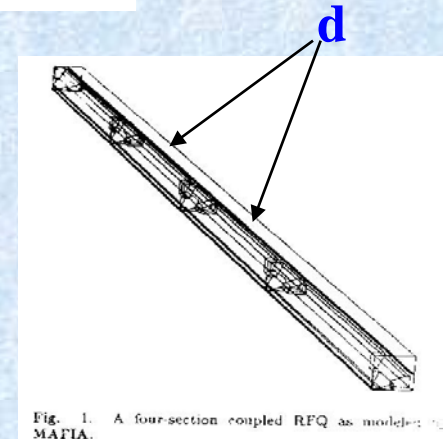


Figure 1 Details of the joint between segments

Спасибо за внимание!